「水文科学が解き明かす不思議な天然水」

1. 低温異常を示す鬼押出し末端湧水群

鈴木 秀和*¹

I. はじめに

群馬・長野県境に位置する浅間山は、現在も活動を続ける活火山であり、最近では2004年と2009年に小規模な噴火活動を起こしている。その周辺には数多くの湧水が分布しており、山麓地域の重要な水資源として活用されている。また東麓には、その優美さから夏季を中心に多くの人が訪れる、避暑地軽井沢の主要な観光スポットである白糸の滝が湧出する (Fig. 1)。その景観や湧出機構、水質特性からみると、この白糸の滝も充分に不思議 (特異) な要素を兼ね備えているが、それ以上に特異な性質をもつ湧水が浅間山麓には存在している。それが今回紹介する、北麓に位置する「鬼押出し末端湧水群」であり (Fig. 1)、活動的な火山山麓に位置するにも関わらず、周囲の湧水に比べ水温が極度に低い「低温異常」を示すことが知られている (鈴木・田瀬, 2007)。

連載の第1回目となる本稿では、「水温的に特異な水」として、この鬼押出し末端湧水群における低温異常 (湧水低温現象) を取り上げた。異常水温と聞いてまず思い浮かべるのは、徳島県吉野川市 (旧鴨島町) の江川湧水であろう。吉野川の旧氾濫原にある湧水であり、確認された当初は冬に水温が20℃以上、夏に10℃以下を示し、気温と水温の年変化が逆に近い位相を持つことで知られていた。これは吉野川から伏流する地下水が温度を保持しながら、3~5 m/day程度の流速で流

下するために引き起こされる現象であると考えられている (新井・横畠, 1990)。一方、鬼押出し末端湧水群の湧水温には明瞭な季節変化は認められず、一年を通してほぼ等しい温度を保っていることから、特有の地下水温形成機構がはたらくことによって低温異常を示すことが推定される。今回は、これまでの研究成果を踏まえてその要因について概説することにした。

Fig. 1 Location map of springs reported in this article.

* 1 神奈川県温泉地学研究所

Ⅱ. 低温異常を示す湧水の位置と概要

天明（1783 年）の噴火時、浅間山の北斜面に流出した鬼押出し溶岩流は、その如何とも形容しがたい景観から名勝地として名高く、鬼押出し園や浅間園といった観光施設が設けられている（Photo 1）。この溶岩流の末端部には集中して数ヶ所の湧水が確認されている。鬼押出し溶岩流の末端部は、浅間園（標高 1400m）付近に谷頭をも

Photo 1 Surface aspect of Onioshidashi lava flow (taken on August 2006).

Fig. 2 Location of springs with remarkably low water temperature around the tip of Onioshidashi lava flow. 1:25,000 topographic map “Kitakaruizawa” published by Geographical Survey Institute of Japan is used.

つ深さ数十 m 以上の馬蹄型谷の一部を埋めており、とくに低温異常を示す湧水（No.1～No.3）はこの谷中に位置している（Fig. 2）。

軽井沢方面から鬼押ハイウェーを進み、鬼押出し園を過ぎた先にある鬼押出し料金所の手前から入る泉ヶ丘別荘地内に数ヶ所の湧水（No.2とNo.3）があり、別荘地の飲用水などに利用されている（Photo 2）。各湧水の年平均水温は No.2 が約 4℃、No.3 が約 5℃である。また、料金所を過ぎ、県道 235 号大笹北軽井沢線との十字路を左折した先に入り口がある「孀恋の里」別荘地の奥には、孀恋村の第一上水道水源として使用されている、浅間山麓でも最大規模の湧水（28,000m³/day）が存在している。水道施設のため残念ながら主湧出口の様子を見ることはできないが、施設脇にある窪地の溶岩流末端崖基部から、小規模ではあるが年間を通じて約 3℃と最も低温を示す湧水（No.1）が湧出している（Photo 3）。

湧水の湧出標高（1170～1220m）よりも若干高所（標高 1230m）に位置する、孀恋村田代（対象地域の 6km 西方）における 7.1℃という年平均気温からみても、湧水温はかなり低温であることが認識される。とくに、気温との差が大きくなる夏季には、その冷たさゆえにほとんど手を浸けて

Photo 2 Spring located in the Izumigaoka villas area (No.2; taken on May 1996).

Photo 3 Spring located in the vicinity of water supply facility of Tsumagio village (No.1; taken on May 2003).

おくことができないほどである。また No.1 のすぐ脇には、後述するように冷気の流出孔があり、天然のクーラーによって周辺の空気が冷やされ涼しく感じられる。

また松島 (1989) によると、古文書の中に「天明噴火の際、鬼押出し溶岩の末端部付近より温泉が湧き出し、それを吾妻川沿いの大笹宿まで引湯し、湯小屋を建て2年後に開業した」との記述があり、村内の鎌原にある別荘地には、引湯の遺構が実際にみられるそうである。その後、大笹の湯は泉温が次第に低下し、文化3年(1806)頃廃止されたそうであるが、その後さらに水温が低下し、現在に至っているものと推定される。このように天明噴火直後の鬼押出し溶岩流末端部の湧水は、現在の状況とは全く異なり、噴出直後の溶岩が持つ熱の影響により、入浴に適するほど高温になっていたことをうかがい知ることができる。

Ⅲ. 浅間山北麓における湧水温の地域特性

今回紹介する鬼押出し溶岩流末端部以外にも、浅間山北麓には数多くの湧水が確認されている

Fig. 3 Regional distribution of spring water temperature on the northern foot of Mt. Asama (modified from Suzuki and Tase, 2007). The alphabets (A~D and H) in this figure represent spring groups with similar physico-chemical properties.

(鈴木・田瀬, 2007)。湧水温の分布を示した Fig. 3 をみてわかるように、標高 1200m の等高線に沿って分布する湧水の水温が、湧出地域により明瞭に異なっている。一般的に湧水温と標高の間には、標高の低下にともない水温が上昇するという逆相関の関係がみられる。湧水群 A (黒斑山麓) と湧水群 D (標高 1000m 付近) の湧水温と標高の間には、一般的な火山山麓同様、明瞭な逆相関関係が認められる (Fig. 4)。しかし、今回紹介する湧水群 B (鬼押出し末端湧水群) の湧水温は、周囲のものに比べ著しく低く、最も高所 (標高 1420m) に位置する湧水よりも 3°C 以上も低い。しかし、そのすぐ東側に位置する湧水群 C (前掛山麓の六里ヶ原地域) の湧水温は、逆に 10.0°C 以上の高温を示している。このように同一標高に位置する湧水でも、それが湧出するまでの過程で受ける様々な影響により、その性状を大きく異にす

Fig. 4 Relationship between spring water temperature and its elevation.

●: Group A (Northern foot of Mt. Kurofu), ○: Group B (The tip of Onioshidashi lava flow), ■: Group C (Rokurigahara area), □: Group D (1000m spring zone), ×: Group H (Upper part of the southern slope)

ることがわかる。また、南斜面の高所に分布する湧水群 H は、より火口に近い場所に位置するため、湧出高度が高いにも関わらず、比較的高い湧水温を示している。

Fig. 4 には、周辺地域の気温およびそれを降水量で重み付けした加重平均値と、標高の関係から得られた回帰直線も示してある。鈴木 (1994) は、この気温の加重平均値を涵養水温と考え、この線 (平均涵養水温回帰直線: Tm) より右側に位置する湧水は地熱の影響を受けたものであり、平均気温の線 (平均気温回帰直線: Ta) より左側に位置する湧水は、大きな流動系を持つもの、つまり涵養高度がかなり高所にある湧水であると述べている。本地域では、大部分の湧水が Ta と Tm の間に位置しているが、湧水群 B は Ta の左 (低温) 側に、そして湧水群 C と H は Tm のより近く、または大きく右 (高温) 側へ外れてプロットされている。

Ⅳ. 湧水温の形成機構

まずは、Fig. 4 で高温側にシフトする湧水群 C

Fig. 5 Relationship between $\log P_{CO_2}$ and carbon isotopic composition of CO_2 equilibrated with dissolved inorganic carbon in spring water ($\delta^{13}C_{CO_2}$). Shadow part represents the mixing trend between deep derived volcanic CO_2 and biogenic soil CO_2 . The symbol legends in this figure correspond to those in Fig. 4.

における湧水温の形成要因について考えてみる。これらの湧水は、現在も活動中である前掛山の山麓に位置し、火山活動の影響を受けたと考えられる SO_4^{2-} や Cl に富む特異な水質特性を示す。鈴木・田瀬 (2010) は $\delta^{13}C$ 値を指標とし、浅間山周辺に分布する湧水中の溶存炭酸に対する火山性 CO_2 ガスの寄与率を求めており、湧水群 A と D ではその影響が少ないのに対し、湧水群 C では 50% 程度の寄与率があることを報告している (Fig. 5)。したがって、湧水群 C の湧水温は火山活動に伴い、通常より大きな地熱の影響を受けた結果、他の湧水群より高温となることが示唆される。また、白糸の滝湧水も同様の性質を持っていることが示されている (Figs. 4 and 5)。なお、山頂火口のより近くに分布する湧水群 H では、低温ガスであるため水温に対し大きな影響を与えることはないが、火山性 CO_2 ガスの寄与率が 90% 以上と非常に高いことが確認されている (Fig. 5)。

このような高温異常は、活動的な火山山麓で良く観察される事例であるが、湧水温が平均気温

より2~3℃低くなる現象は、大きな流動系をなす地下水が涵養地点における水温を維持したまま流下し湧出しているとされる、富士山麓で確認されているのみである（鈴木，1994）。鬼押出し末端湧水群における低温異常についても、同じような要因が考えられる。しかし、標高1200m付近に位置し、火山活動による地熱の影響がない湧水群Aに含まれる湧水温が約8℃であり、涵養高度に関係する $\delta^{18}\text{O}$ 値もほぼ同様の値であることから、本地域における低温異常は、局所的な地温（低温）の影響をうけた結果であると推定される。

鈴木・田瀬（2007）では、No.1近傍および浅間園における冷氣流出口の存在からみて、溶岩流内部は明らかに低温状態にあることが指摘されている。このような地下空間における低温現象は、富士山北麓の溶岩トンネルや日本各地の累石風穴において確認されている。両者とも冬季に氷点下の冷氣が重力流として地下空間内部に流入することで、低温状態が作り出される。そして地表面が高温になる夏季には極めて安定した成層状態になるため、冬季の低温状態が維持される（Fig. 6; Tanaka et. al., 2000）。塊状溶岩である鬼押出し溶岩流末端部付近は、大きな岩塊に覆われており中心部も亀裂に富むことから、累石風穴形成場と同じような条件を備えており、冷氣流出口の存在から風穴循環系が成り立っていることが示唆される。このように溶岩流内部の岩塊が年間を通して低温に保たれていることが、湧水の低温異常を引き起こす重要な要因であると考えられている。しかし、低温状態の溶岩流内部に滞留・流動することのみによって、多量の地下水を5℃近くも冷却することが本当に可能であるか、今後は熱収支的な観点からの考察も必要と思われる。

V. 鬼押出し末端湧水群でみられる水温以外の特異的な性状

近年、 $\delta^{13}\text{C}$ 値を用いた鈴木・田瀬（2010）の研究によって、鬼押出し溶岩流末端部における特異な湧出形態が明らかにされた。浅間山周辺の湧

Fig. 6 Schematic representation of wind hole circulation in the tip of Onioshidashi lava flow with interconnected many fractures.

In winter season, relatively high density cold air ($<-10^{\circ}\text{C}$) inflows into fractured open space in lava flow, and lava blocks are cooled. In summer season, relatively low density warm air ($>+20^{\circ}\text{C}$) never inflow into the deeper part of lava flow because cold condition of that is preserved by temperature stratification. Thus low temperature condition is kept in the interior of lava flow through the year.

水中の溶存炭酸は、土壌 CO_2 （ $\delta^{13}\text{C}$ 値 $<-23\text{‰}$ ）と火山性 CO_2 （ $\delta^{13}\text{C} = -8.5\text{‰}$ ）の二成分混合によって形成されているが、鬼押出し末端湧水群ではその傾向から大きく外れ、比較的高い $\delta^{13}\text{C}$ 値を示す一方で、 CO_2 分圧（ Pco_2 ）が低いという特徴が認められた（Fig. 5）。これは、火山性 CO_2 の影響を受けた地下水が、その流出過程において通気性の高い溶岩の亀裂系を流動するために溶存 CO_2 の脱ガスが起こった結果と考えられている。

現在の浅間園や鬼押出し園という観光施設が広がる地域には、1783年（天明）の噴火以前、柳井沼と呼ばれる沼沢地が存在していた（山田ほか，1993）。したがって、この付近は山体斜面で涵養された地下水の流出域であると推定される。現在は60m以上の層厚をもつ溶岩流に覆われているため、地下水は湧水として地表に流出せず、さらに下方へと通気性の高い溶岩流内部を流動する過程

で溶存 CO_2 が脱ガスし、最終的に溶岩流が途切れる末端部において湧水として湧出することが予想される。鬼押出し湧水群の水温や水質に大きな季節変動がみられないことから、馬蹄型谷頭付近に地下水貯留層の存在が推定される。

また近年、CFCs による地下水の涵養年代の推定も行われ、No.1 の湧水の平均滞留時間が約 30 年であることが推定されている（日本水文学会「日本の火山の地下水ワーキンググループ」未公表データ）。これは雪解けの冷たい水が、透水性の高い溶岩中を流れ、直接その末端部で湧水として湧出しているものではないことを意味しており、地下水貯留層の存在を支持する結果となっている。

VI. おわりに

今回は「水温的に特異な水」として、鬼押出し末端湧水群における低温異常を取り上げ、その要因であると考えられる地下空間における低温形成のメカニズムとして、風穴循環について概説した。鬼押出し末端湧水群では、通常とは異なる水文環境を反映した結果、低温異常が引き起こされていることが分かってきたが、その全容解明には、さらなる研究の蓄積が必要とされている。現地へのアクセスには軽井沢駅から車で 1 時間程かかるが、夏場の避暑を兼ねて、白糸の滝などと併せて訪れることをお勧めしたい。多くの方にこの湧水の冷たさを実感していただき、不思議な水の成り立ちについての興味や見識を深めていただく機会となれば幸いである。

参考文献

- 新井 正・横畠道彦 (1990) : 徳島県江川付近の地下水. の温度と流動. 地理学評論, **63A**, 343-355.
- 鈴木秀和・田瀬則雄 (2001) : 名水を訪ねて (52) 浅間山麓の名水. 日本地下水学会誌, **43**, 43-49.
- 鈴木秀和・田瀬則雄 (2007) : 浅間山北麓における湧水温の形成機構と地域特性. 日本水文学会誌, **37**, 9-20.
- 鈴木秀和・田瀬則雄 (2010) : 浅間山における湧水の溶存炭酸の炭素同位体比一火山性 CO_2 の寄与率の推定一. 日本地下水学会誌, **52**, 247-260.
- 鈴木裕一 (1994) : ハヶ岳の湧水および地下水の水温について. ハイドロロジー (日本水文学会誌), **24**, 83-92.
- 松島榮治 (1989) : 「大笹の湯」引湯跡. 広報つまごい, **561**, http://interpreter.jp/matsushima_eiji/001-052/019.html.
- 山田 孝・石川芳治・矢島重美・井上公夫・山川克己 (1993) : 天明の浅間山噴火に伴う北麓斜面での土砂移動現象の発生・流下・堆積実態に関する研究. 新砂防, **45**(6), 3-12.
- Tanaka, L.H., Nohara, D. and Yokoi, M. (2000): Numerical simulation of wind hole circulation and summertime ice formation at Ice Valley in Korea and Nakayama in Fukushima, Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, **78**, 611-630.